第 39 卷 第 4 期
2021 年 12 月
天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY
Vol. 39, No. 4
Dec., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.04.07

日长变化、大气角动量和 ENSO 年际信号的相关分析及 2020—2021 年拉尼娜事件

孔昭洋[1,2]，周永宏[1,2,3]，许雪晴[1,3]，安显然[1,4]

(1. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 2. 中国科学院大学，北京 100049； 3. 中国科学院 行星科学重点实验室，上海 200030； 4. 上海市空间导航与定位技术重点实验室，上海 200030)

摘要： 作为年际尺度最强的气候变率，厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 的发生对全球天气-气候有显著的影响，同时也与地球自转变化和大气角动量 (AAM) 的年际信号密切相关。基于 1962 年 1 月－2021 年 1 月美国国家环境预报中心/国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 的再分析资料集 (R1)，进行大气角动量函数计算，并将其与同时段年际分量的日长变化 (ΔLOD) 数据以及表征 ENSO 的海洋尼诺指数 (ONI) 和南方涛动指数 (SOI) 资料相对比：通过互相关分析和小波变换等统计方法分析了 ENSO, AAM, ΔLOD 的关联性，并给出相应过程的物理解释。同时，应用这些关联性和可能的物理过程，在日长变化的年际分量上检测到正在发生的 2020－2021 年中等强度拉尼娜事件信号，且在此期间年际 ΔLOD 已经产生约 -0.18 ms 的变化。

关 键 词： 日长变化；大气角动量；ENSO；拉尼娜；小波分析

中图分类号： P183.3 **文献标识码：** A

1 引 言

厄尔尼诺-南方涛动 (El Nino-Southern Oscillation, ENSO) 是指大约每 2~7 a 出现在热带太平洋地区的气候系统年际振荡。作为一种海–气耦合现象，ENSO在海洋中表现为每隔几年出现在赤道中–东太平洋表层海水的暖或冷异常，厄尔尼诺 (El Nino) 对应暖异常，拉尼娜 (La Nina) 对应冷异常。在大气中，ENSO 表现为南方涛动，即为赤道东、西太平洋之间海平面气压存在的此消彼长现象。

收稿日期： 2021-03-02； **修回日期：** 2021-04-01

资助项目： 国家自然科学基金项目 (11673049, 11773057)；中国科学院青年创新促进会项目 (2019265)

通讯作者： 周永宏，yhzhou@shao.ac.cn

地球自转变化不仅表征了太阳、月球和其他行星引力等外力矩的影响，还反映了固体地球内部地核与地幔的相互作用，以及地球表面海洋和大气等流体圈层的耦合过程。在年际以及更高频时间尺度上，大气和海洋等地球表层流体活动是影响地球自转速率变化的主要原因[1−5]。其中，作为年际尺度上最强的气候变率，ENSO 是导致日长年际变化的重要因子。

在不考虑外力矩作用的情况下，固体地球和大气、海洋等流体圈层可近似看成保守的动力学系统。根据总角动量守恒原理，大气和海洋的动力学过程所引起的角动量变化，会使固体地球的角动量产生相反的变化，从而使地球自转速率或日长 (length of day, LOD) 发生相应改变。因而，日长变化 (ΔLOD) 与 ENSO 事件之间有密切的联系。

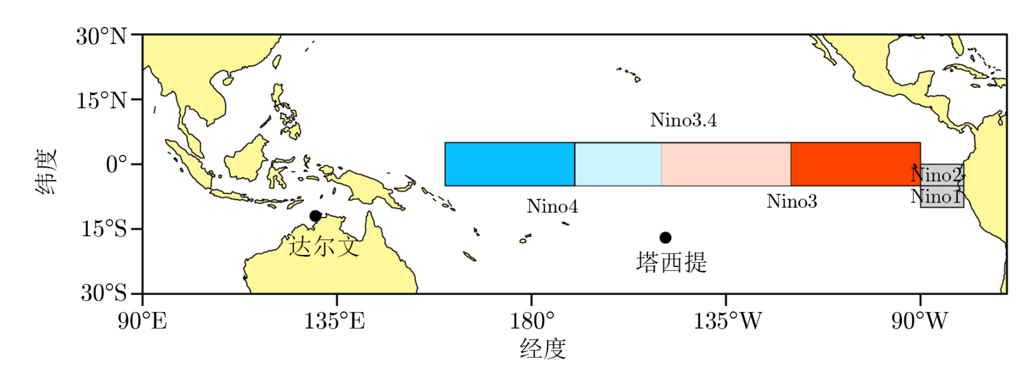
针对 ΔLOD、大气角动量 (atmospheric angular momentum, AAM) 与 ENSO 的联系，许多学者开展了相关研究：Langley 等人[6]最早给出了 AAM 与 ΔLOD 之间的定量关系。Stefanick[7]基于 1963－1973 年的数据指出年际尺度上 LOD 的变化、AAM 与南方涛动指数 (southern oscillation index, SOI) 具有相似性。在经历了 1982－1983 年的超强厄尔尼诺事件后，Rosen 和 Salstein[8]在 AAM 和 ΔLOD 中检测到了 1982－1983 年的超强暖事件信号。Eubanks 等人[9]、Chao[10] 通过超前滞后相关得到南方涛动指数超前日长年际变化 1~2 月，表明年际分量的 ΔLOD 主要由 ENSO 引起。此后，Dickey 等人[11−13] 认为年际 ΔLOD 主要由与 AAM 轴向分量有关的 χ_3 激发，同时指出大气角动量存在起源于赤道并向中高纬度传播的趋势，且与 ENSO 密切相关；之后还提出海表面温度 (sea surface temperature, SST) 的低频变化可能是年际和年代际尺度 AAM 发生变化的激发源；以及极向的热带温度梯度 (tropical temperature gradient, TTG) 在太平洋中部海区 (Nino3.4) 平均 SST 出现最大异常后的 1~2 月达到峰值，因此认为是 TTG 所引起的热成风异常驱动了大气角动量中的风项，从而解释了 ENSO 对年际 ΔLOD 的驱动。近年来，de Viron 和 Dickey[14] 对两种不同类型的厄尔尼诺事件 (东部型和中部型) 与 ΔLOD 的关系进行了 AAM 与力矩方面的研究，认为东部型 ENSO 的 AAM 信号比中部型大 2 倍以上，并用力矩解释了这一差异，同时认为东太平洋型 ENSO 具有更大的山脉力矩和摩擦力矩；山脉力矩越大说明 AAM 异常越强，但与此异常相关的风速在地表产生较强的负摩擦力矩又对 AAM 异常起到抵消作用。Lambert 等人[15]对 1980 年以来 3 次超强厄尔尼诺事件鼎盛时期的 AAM 和力矩与 ΔLOD 的关系进行了分析，认为在 1982－1983 年和 1997－1998 年的东部型事件期间，ΔLOD 主要受山脉力矩驱动，而对 2015－2016 年的东部–中部混合型事件，摩擦力矩补偿了较弱的山脉力矩而驱动 ΔLOD 异常。

基于以上研究，本文采用 1962 年 1 月－2021 年 1 月内国际地球自转与参考架服务 (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) 的日长变化观测值序列、基于美国国家环境预报中心/大气研究中心 (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR) 再分析资料集 R1 归算的大气角动量函数，与表征 ENSO 的海洋尼诺指数 (ocean Nino index, ONI) 和经过标准化的负南方涛动指数 (minus southern oscillation index, MSOI) 进行对比，综合分析地球自转变化、AAM 和 ENSO 在年际尺度上的关联性，尝试给出过程中对应的物理解释，同时在 ΔLOD 年际分量中检测到 2020－2021 年拉尼娜事件的信号。

2 资料与数据处理

2.1 厄尔尼诺-南方涛动

由于 ENSO 本身所具有的多样性和复杂性[16,17]，给出准确的定义并测定其持续时间和强度是一项有相当难度的工作。常用的判定标准一般来自美国国家海洋与大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)，将热带太平洋分成了 Nino1+2, Nino3, Nino3.4, Nino4 海区 (如图 1 所示)，其中 Nino3.4 海区是业务上定义的热带太平洋中部区域[18]。NOAA 对 ENSO 的定义为：热带太平洋中部 (Nino3.4) 的季节性 (任意连续 3 月的平均值) 海表温度 (SST) 比对应区域的气候态平均值高 0.5℃(厄尔尼诺) 或低 0.5℃(拉尼娜)。而对厄尔尼诺事件和拉尼娜事件起止时间和强度的判定主要以海洋尼诺指数 (ONI) 为标准，ONI 指数的每个数据点均使用连续 3 月 Nino3.4 的海表面温度异常 (sea surface temperature anomaly, SSTA) 滑动平均值，如果连续出现至少 5 月的 ONI $|SSTA| \geqslant 0.5$℃ 便会被定义为一次厄尔尼诺或者拉尼娜事件，这些冷暖异常事件通常具有广泛的影响。值得注意的是，目前 ONI 指数的 SSTA 基于第 5 个版本的 NOAA 扩展重构海温资料 (extended reconstructed sea surface temperature version 5, ERSSTV.5)，该版本以每 5 年滚动更新一次气候态的方式，以尽可能地消除 Nino3.4 海区 SST 长期变暖趋势对 ENSO 监测的影响[19]。



注：具体坐标为，Nino1 (0° ~ 5°S, 90°W ~ 80°W)，Nino2 (5° ~ 10°S, 90°W~80°W)，Nino3 (5°N ~ 5°S, 150°W~90°W)，Nino3.4 (5°N ~ 5°S, 170°W~120°W)，Nino4 (5°N ~ 5°S, 160°E~150°W)，塔西提 (17°S, 149°W)，达尔文 (12°S, 130°E)(根据 NOAA 修正)。

图 1 Nino 指数分区与塔西提 (Tahiti) 和达尔文 (Darwin) 位置示意图

南方涛动指数 (SOI) 用来衡量南方涛动在大气中的表征，为塔西提岛 (热带东太平洋) 与达尔文港 (热带西太平洋) 海平面气压差的月平均标准化指标，见图 1。有时 SOI 也是衡量赤道太平洋东风强度的指标，其正值对应拉尼娜相关的赤道东风异常，负值对应厄尔尼诺相关的赤道西风异常[20]。图 2 为 1962 年 1 月－2021 年 1 月标准化的 SOI 与 Nino3.4 SSTA 的月平均序列对比 (数据来自 NOAA)，可见两者呈负相关且气压的改变相比于海温异常的变化更具高频噪声波动。值得注意的是：两者在对ENSO强度的描述方面并不完全相似，如

对 1982－1983 年、1997－1998 年和 2015－2016 年这 3 次超强厄尔尼诺事件中最大强度的反映，*SOI* 有递减趋势，而 Nino3.4 SSTA 则显示递增趋势。但另一方面，这两个指数通常具有良好的时间同步性，图 3 显示了ENSO在海洋与大气中的不同表征指数在不同修正方法下的相关性，时间区间选取基本同上，可见月平均的 *SOI* 与 Nino3.4 SSTA (绿色点划线)、3 月滑动平均的 *SOI* 与 *ONI* (Nino3.4 SSTA 月数据的 3 月滑动平均值) (红色点划线)、*SOI* 与 *ONI* 的年际 (1~10 a) 分量 (蓝色点划线) 均显示最大负相关同步，且相关系数由于序列平滑性的增加依次增强为 −0.73, −0.84 和 −0.92。

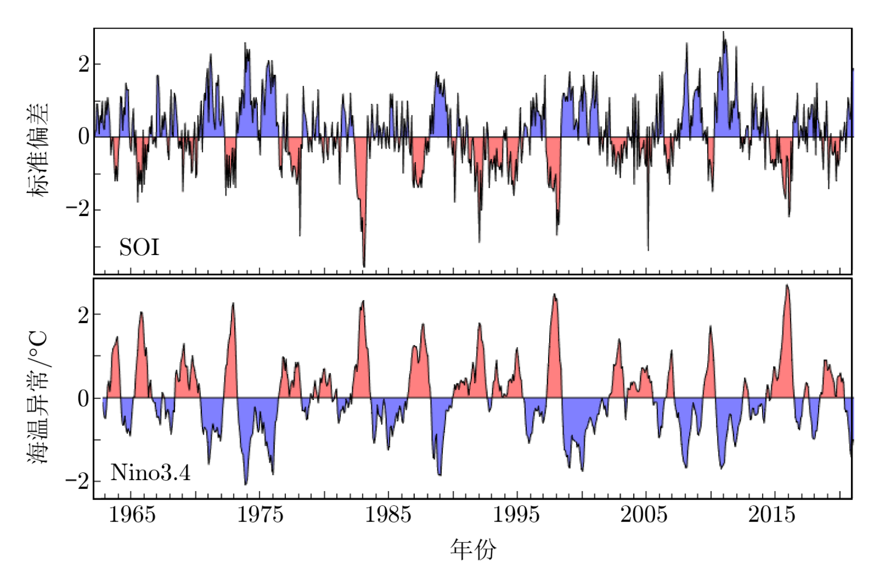
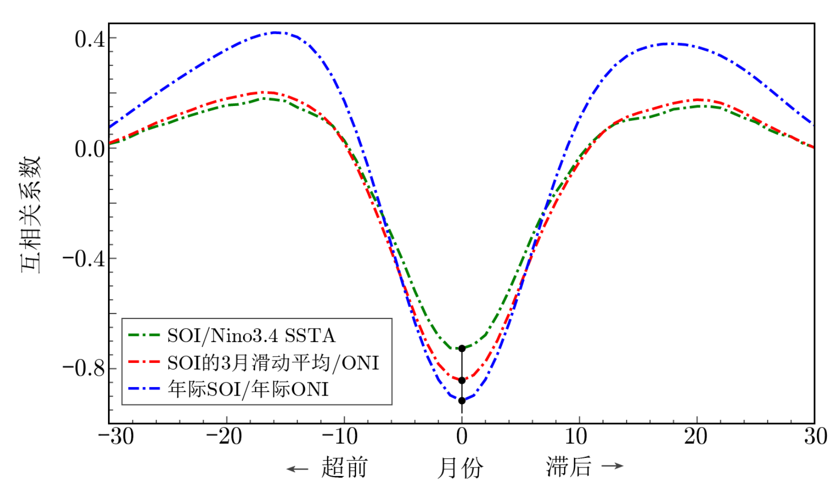


图 2　1962 年 1 月—2021 年 1 月的南方涛动指数 (*SOI*) 与 Nino3.4 海表温度异常



注：1962 年 1 月—2021 年 1 月的 *SOI* 与 Nino3.4 (绿色点划线)、*SOI* 的 3 月滑动平均与 *ONI* (红色点划线)、年际 *SOI* 与年际 *ONI* (蓝色点划线) 的超前滞后相关。

图 3　ENSO 在海洋与大气中的不同表征指数在不同修正方法下的相关性

为了与 ONI 所示的 ENSO 冷暖相位有相同的对应，本文将南方涛动指数取负得到负南方涛动指数 (MSOI)。为了去除滤波过程中端部效应的影响，本文先将时间序列用自回归 (auto-regressive, AR) 模型进行左右端部各延拓 30 月，再通过带通 1~10 a 的 2 阶巴特沃斯滤波器，最后去除端部效应影响较大的 AR 模型延拓部分，得到年际分量的时间序列[21]。

2.2 日长变化

绕地球自转轴旋转速率的变化通常用日长变化 (ΔLOD) 表示：

$$\frac{\Delta LOD}{86\,400} \approx \frac{-\Delta\omega}{\omega_0} \quad , \tag{1}$$

式中，ΔLOD 表示地球自转日长的变化，$\Delta\omega$ 表示地球自转角速度的变化，ω_0 表示地球自转的平均角速度。由式 (1) 可知地球自转的日长变化 (ΔLOD) 与地球自转角速度的变化 ($\Delta\omega$) 成反比[22]。

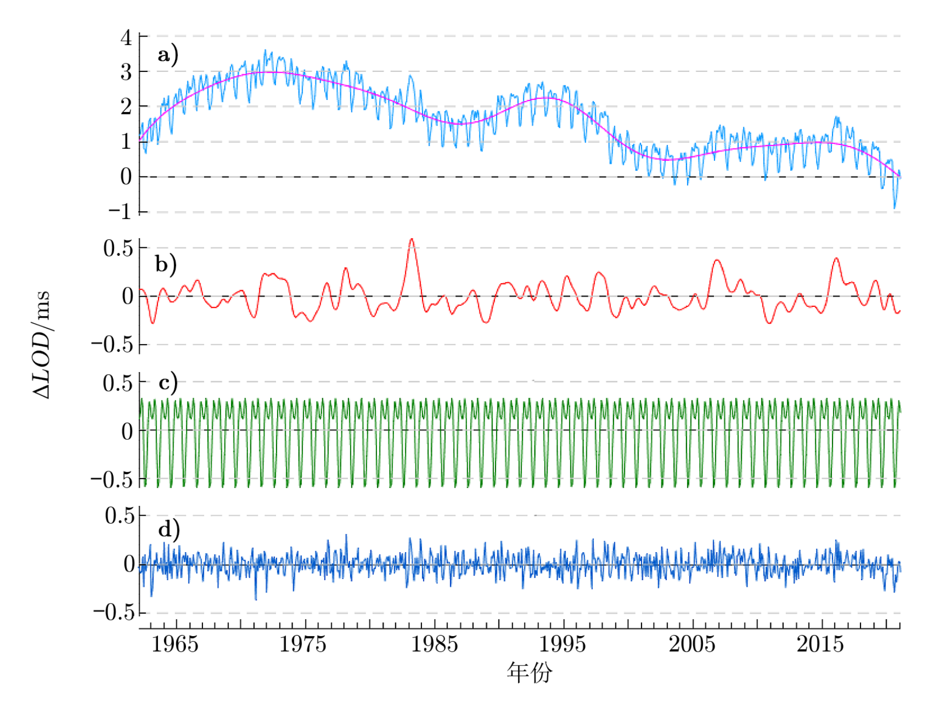
国际地球自转与参考架服务 (IERS) 提供了自 1962 年 1 月 1 日以来包含日长变化 (ΔLOD) 在内地球自转参数 (earth orientation parameters, EOP) 的日观测数据。这些数据最早由光学天体测量方法得到，自 20 世纪 70 年代起逐渐由激光测月 (lunar laser ranging, LLR)、激光测卫 (satellite laser ranging, SLR)、甚长基线干涉 (very long baseline interferometry, VLBI)、全球卫星导航定位系统 (global navigation satellite system, GNSS) 以及星基多普勒轨道和无线电定位组合系统 (Doppler orbitography and radio positioning integrated by satellite, DORIS) 等现代空间大地测量技术测量得到[23]。目前最新的 EOP 14 C04 序列，对日长变化的测量精度达到微秒水平。

本文选取 1962 年 1 月 1 日—2021 年 1 月 31 日的 ΔLOD 时间序列进行分析。考虑地球系统内角动量守恒，需要去除潮汐外力矩，根据 IERS 规范计算并扣除固体潮中带谐项对 LOD 的贡献，得到非潮汐的 ΔLOD 日数据，然后转为月平均数据[24,25]。扣除潮汐后的日长变化序列及其分解序列显示于图 4，其中，图 4a) 的浅蓝色实线和粉色实线分别表示非潮汐的多尺度日长变化序列和通过多项式拟合得到的日长变化“十年”尺度项；图 4b) 红色实线表示：对非潮汐日长变化序列扣除“十年”尺度项和季节项后，通过前述的AR模型扩展、巴特沃斯滤波器滤波，以及端部效应扣除得到的与 ENSO 对应的年际尺度 ΔLOD 时间序列；图 4c) 中绿色实线表示通过叠加周年项、半年项和 1/3 年项拟合得到的季节项；图 4d) 深蓝色实线为 ΔLOD 的亚季节等高频项。

2.3 大气角动量

为了研究大气角动量对日长变化的激发情况，本文使用 Eubanks 给出了轴向的大气角动量函数 (atmospheric angular momentum function, AAMF) χ_3 分别对于压力项 (χ_3^{p}) 和风项 (χ_3^{w}) 的表达式[26]：

$$\begin{cases} \chi_3^{\mathrm{p}} = \dfrac{0.753R^4}{gC_{\mathrm{m}}} \displaystyle\int\int p_{\mathrm{s}} \cos^3\varphi \mathrm{d}\lambda \mathrm{d}\varphi \\ \chi_3^{\mathrm{w}} = \dfrac{0.998R^3}{gC_{\mathrm{m}}\Omega} \displaystyle\int\int\int u \cos^2\varphi \mathrm{d}p \mathrm{d}\lambda \mathrm{d}\varphi \end{cases} \quad , \tag{2}$$



注：a) 扣除潮汐项 ΔLOD (浅蓝色实线) 和拟合的 ΔLOD “十年”尺度项 (粉色实线)；b) 滤波得到的 ΔLOD 年际项；c) 拟合的 ΔLOD 季节项；d) ΔLOD 亚季节等高频项。

图 4　1962 年 1 月—2021 年 1 月的月平均 ΔLOD 多时间尺度分解示意图

其中，u 为纬向西风，p_s 为地表大气压力，R 为地球半径，Ω 为地球平均自转速率，g 为重力加速度，取 9.8 $\mathrm{m \cdot s^{-2}}$，C_m 为地幔轴向主转动惯量，λ 为经度，φ 为纬度。

上式中需要用到的地表大气压力和水平风场等气象要素资料来自美国国家环境预报中心/美国大气研究中心 (NCEP/NCAR) 的再分析资料集 R1，数据输出间隔为 6 h (每日以 GMT 00:00 点起始)，网格分辨率为 $2.5° \times 2.5°$，风场垂直方向从 1 000~10 hPa，共 17 层[27,28]。值得注意的是：压力项的计算中，由于选取的是 1962－2021 年的长期数据，所以应该考虑海平面高度随气压的变化。因此，本文使用反变气压 (inverted barometer, IB) 近似，即假设海洋对大气压力变化存在响应[29,30]。在风项计算时，本文依据前人工作考虑了地形因素的影响，即从不同地形起伏所对应的高度垂直积分至 10 hPa[31]。轴向大气角动量函数 (AAMF χ_3) 为压力项与风项之和。为了与日长变化的观测单位 (ms) 相一致，还需将 χ_3 乘上转换因子 8.64×10^7 ms·rad^{-1}。最后，将所得序列扣除与 ΔLOD 类似的拟合季节项后，经 AR 模型延拓和 1~10 a 频段滤波以及端部效应扣除，得到与 ENSO 指标和 ΔLOD 相对应的 AAM 年际分量。

3　对比分析结果

图 5 显示的是 ΔLOD, AAM 与 MSOI 的年际分量对比，可见在年际尺度上三者有相似

的起伏趋势，典型的 1982—1983 年、1997—1998 年和 2015—2016 年超强厄尔尼诺事件分别体现在这三者的振幅上。图 6 给出了以上年际分量时间序列的超前滞后相关情况，其中相关系数检验均超过 99% 的显著性水平[32]。可见 MSOI 分别超前于 AAM (蓝色实线) 和 ΔLOD (红色实线) 约 1 月，且 MSOI 与 AAM 和 ΔLOD 的最大相关系数分别达到 0.69 和 0.55。另一方面，AAM 与 ΔLOD 同步 (绿色实线)，相关系数达到 0.70。这反映了在年际尺度上，固体地球与表层大气海洋系统之间的强烈耦合作用，同时也验证了在外力矩为 0 时大气与固体地球角动量守恒下的瞬时转换过程。图 6 所得结论与前人研究基本一致[7,11−13,33]。

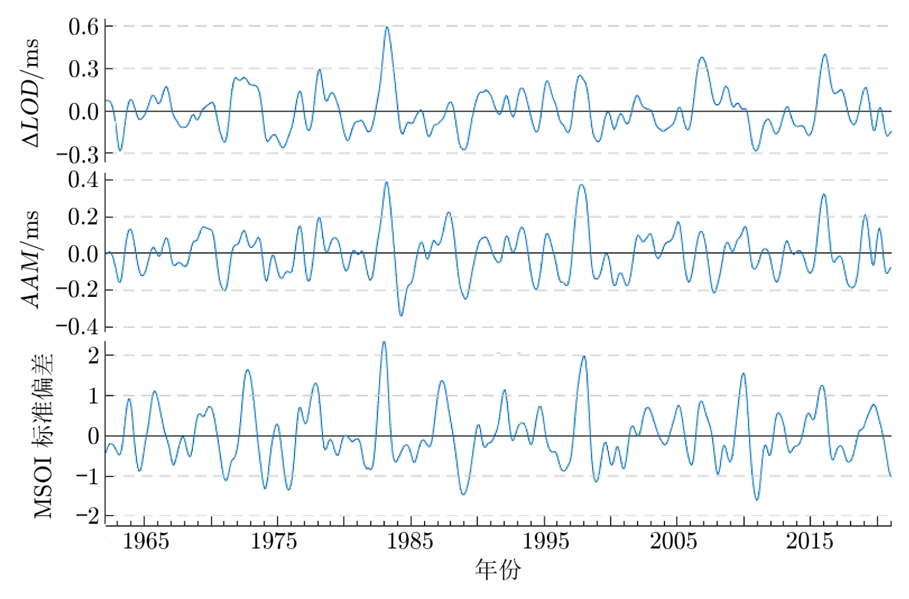


图 5　1962 年 1 月—2021 年 1 月间 ΔLOD, AAM, MSOI 的年际分量对比

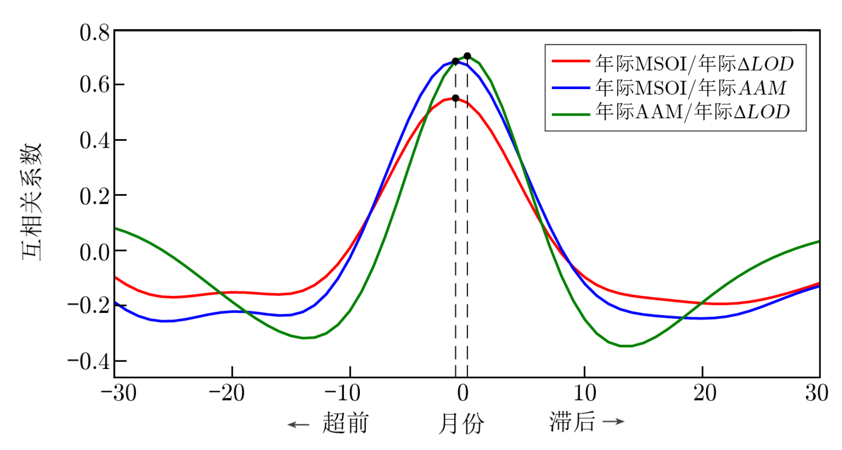


图 6　1962 年 1 月—2021 年 1 月间的年际分量时间序列的超前滞后相关情况

为了进一步分析年际尺度上日长变化、大气角动量激发和南方涛动的时频特征，本文引

入正则化 Morlet 小波[34]。设时间序列为 $f(t)$，定义小波函数为：

$$W_\phi(f)(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \mathrm{d}t \quad , \tag{3}$$

其中，$\Psi(t)$ 为基本小波，a 为确定频率特征的伸缩尺度因子，b 为时间域上的平移因子，小波变化可以同时用于分析准周期时变序列的时间域和频率域特征。图 7 给出 ΔLOD, AAM 和 MSOI 在年际分量上的小波谱结果，其中红色对应正相位，蓝色对应负相位，颜色越深表示强度越大。可见 ΔLOD, AAM 和 MSOI 在年际分量上具有相似的时频分布结构。

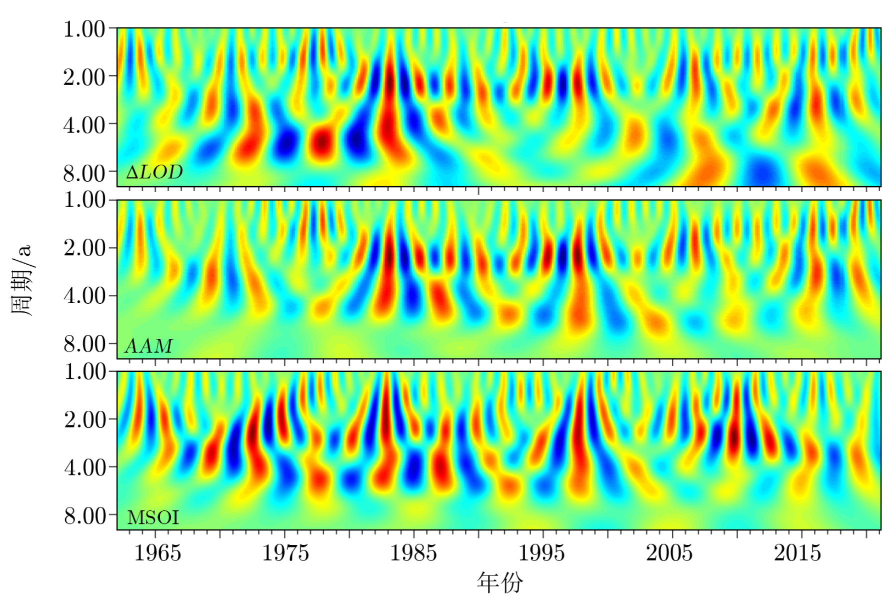


图 7　1962 年 1 月—2021 年 1 月间 ΔLOD, AAM 和 MSOI 的年际分量小波分析谱

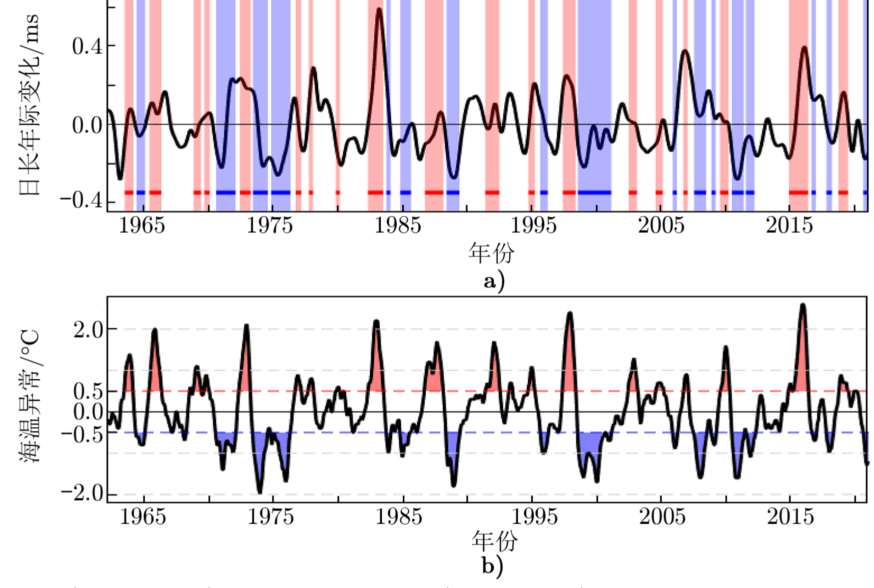
以上统计分析结果反映了 ENSO 通过影响大气角动量进而导致地球自转速率发生改变的过程。总体来说，当厄尔尼诺出现时，MSOI 指数为正 (SOI 指数为负)，表征赤道东风带的信风减弱，出现西风异常，这将导致纬向沃克 (Walker) 环流减弱；同时，由于厄尔尼诺期间的热带太平洋暖海水异常加热大气，使得经向哈德来 (Hadley) 环流增强，进一步使副热带西风急流增强。图 6 显示年际分量的 MSOI 超前于 AAM 与 ΔLOD 1 月左右，可能是由于热带海气相互作用通过大气的经向环流输送使副热带出现异常响应所需要的时间。在厄尔尼诺期间热带太平洋上空出现的西风异常以及副热带西风急流的增强等过程共同导致了 AAM 因西风分量的增加而增强。由于固体地球与大气的系统总角动量守恒，AAM 的增加使得地球自转减速，ΔLOD 增加。当厄尔尼诺通过皮耶克尼斯正反馈 (Bjerknes feedback)[35]达到峰值后开始逐渐消亡时，其产生的大气环流异常也会逐渐恢复，在此期间 AAM 和 ΔLOD 会相对降低，因此通常出现 AAM 和 ΔLOD 极大值。前人在研究中也提及了类似的反馈过程[8,36,37]。

反之，在拉尼娜期间，由于赤道东太平洋出现冷海水异常，赤道东风增强，纬向沃克环流增强，经向哈德来环流减弱，副热带西风急流减弱。热带和副热带的东风分量增强，导致

AAM 减弱，根据地气系统角动量守恒，地球自转速率增加，ΔLOD 降低。同理，当拉尼娜开始消亡时，AAM 和 ΔLOD 往往会相对增加，而通常导致 AAM 和 ΔLOD 极小值的出现。

值得注意的是，尽管 ENSO 是气候系统年际尺度的最强变率，也是影响日长变化年际分量的重要原因，但由于导致地球自转速率变化的原因非常复杂，所以 ENSO 并不能完全解释年际尺度的日长变化。平流层准两年振荡 (quasi-biennial oscillation, QBO) 等气候模态和一些地球内部物理过程也可能对日长变化的年际分量产生影响[26,38]。

图 8 显示了大致时间段内 ΔLOD 年际分量与 ONI 的对比情况。其中，如 ONI 部分所示，截至 2021 年 1 月末，2020 年 7 月至 2021 年 1 月期间 Nino3.4 海区 SSTA 连续 3 月滑动平均值所得的 ONI 指数已经满足连续 5 月 $SSTA \leqslant -0.5$℃的拉尼娜事件判定条件。ONI 指数的峰值出现在 2020 年 11 月 (Nino3.4 OND SSTA 平均) 达到 −1.3℃，根据 NCAR 的标准[18]，是一次中等强度的拉尼娜事件。同时，将图中的 ΔLOD 年际分量与 ONI 序列 (厄尔尼诺事件 (红色填充) 和拉尼娜事件 (蓝色填充)) 进行对比，可以发现，年际分量的 ΔLOD 并不完全与以 ONI 指数为判定标准的 ENSO 冷暖事件在起止时间和强度上严格对应，这可能是由于两种数据分辨率不同、数据处理方法导致的误差以及影响 ΔLOD 因素的复杂性所致。按照基于 ONI 的判定标准，从 1962 年 1 月至 2020 年 1 月，共出现了 19 次厄尔尼诺事件以及 16 次拉尼娜事件，如果忽略上述导致 ONI 和 ΔLOD 对应上出现误差因素的影响，几乎所有的厄尔尼诺和拉尼娜事件均使年际分量的 ΔLOD 出现对应的极大值和极小值。对于目前仍在持续的 2020 年夏季至 2021 年春季中等强度拉尼娜事件，年际 ΔLOD 在对应时期出现幅度约 −0.18 ms 的变化 (图 8a) 右侧)，我们将持续关注本次事件的后续进展。



注：a) 1962 年 1 月—2021 年 1 月 ΔLOD；b) 1962 年 1 月—2020 年 12 月 ONI。

图 8 ΔLOD 年际分量与 ONI 的对比图

4　总结与讨论

本文基于天文观测的日长变化序列、大气角动量和表征 ENSO 的 SOI 与 ONI 指数，分析了三者在年际时间尺度上的关联性，并尝试给出物理过程描述，同时检测到年际日长变化中的 2020−2021 年拉尼娜事件信号。

由 ENSO、大气角动量及日长变化得到的互相关关系，除了验证 ONI 与 MSOI 这两个分别表征 EN 与 SO 的指数具有很好的相关性和同步性以外，还显示了 ΔLOD, AAM 和 MSOI 在统计意义上的超前滞后关系。可知 ΔLOD 与 AAM 基本同步，反映了大气与固体地球角动量在系统总角动量守恒条件下的瞬时转换过程。而 MSOI 分别超前于 AAM 和 ΔLOD 约 1 月，则从统计角度说明，ENSO 是 ΔLOD 在年际尺度上的重要激发源。

基于现有的观测资料，从 1962 年 1 月至 2021 年 1 月，共出现了 19 次厄尔尼诺事件和 17 次拉尼娜事件。由于厄尔尼诺和拉尼娜会导致热带及副热带大气环流出现异常 (反映为 AAM 的变化)，因此也会使 LOD 出现相应改变。对于 2020 年夏季至 2021 年春季发生的中等强度拉尼娜事件，反映在地球自转上是转动速率加快，且年际日长变化序列在对应时期出现了幅度约 −0.18 ms 的变化。截至 2021 年 2 月底，本次拉尼娜事件仍在延续，我们将继续关注相关的天文和气象发展过程。

致谢

感谢国际地球自转与参考架服务 (IERS) 和美国国家环境预报中心/大气研究中心 (NCEP/NCAR) 提供的数据资料。感谢审稿专家及编辑部老师对本文提出的宝贵意见。

参考文献：

[1] Lambeck K. The Earth’s Variable Rotation. Cambridge: Cambridge University Press, 1980: 449
[2] 周永宏, 郑大伟, 虞南华,等. 科学通报, 2000, 45(024): 69
[3] 马利华, 韩延本, 尹志强. 地球物理学进展, 2004, 19(4): 968
[4] 王琪洁, 廖德春, 周永宏,等. 天文学报, 2007, 48(1): 93
[5] Gross R S. Treatise on Geophysics, Second Edition, Gerald Schubert (ed.). Amsterdam: Elsevier, 2015: 215
[6] Langley R B, King R W, Shapiro I I, et al. Nature, 1981, 294(5843): 730
[7] Stefanick M. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1982, 87(C1): 428
[8] Rosen R D, Salstein D A. Science, 1984, 225(4660): 411
[9] Eubanks T M, Steppe J A, Dickey J O. Earth Rotation: Solved and Unsolved Problems. Cazenave A (ed.). Boston: Reidel Publishing Company, 1986: 163
[10] Chao B F. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1988, 93(B7): 7709
[11] Dickey J O, Marcus S L, Hide R. Nature, 1992, 357: 484
[12] Dickey J O, Marcus S L, Deviron O. Geophysical Research Letters, 2003, 30(11): 1573
[13] Dickey J O, Marcus S L, Chin T M. Geophysical Research Letters, 2007, 34(17): 803
[14] de Viron O, Dickey J O. Journal of Oceanography, 2014, 41(10): 3407
[15] Lambert S B, Marcus S L, Viron O D. Earth System Dynamics, 2017, 8(4): 1009

[16] Capotondi A, Wittenberg A T, Newman M, et al. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 96(6): 921
[17] Timmermann A, An S I, Kug J S, et al. Nature, 2018, 559(7715): 535
[18] Trenberth K, et al. The Climate Data Guide: Nino SST Indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI). https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni, 2020
[19] Huang B, Thorne P W, Banzon V F, et al. Journal of Climate, 2017, 30(20): 8179
[20] Trenberth K, et al. The Climate Data Guide: Southern Oscillation Indices: Signal, Noise and Tahiti/Darwin SLP (SOI). https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/southern-oscillation-indices-signal-noise-and-tahitidarwin-slp-soi, 2020
[21] Wiley J. Programs for Digital Signal Processing. New York: IEEE. 1979: 1
[22] 郑大伟. 天文学进展, 1988,6(4): 316
[23] 叶叔华, 黄珹. 天文地球动力学. 济南: 山东科学技术出版社, 2000: 1
[24] Petit G, Luzum B (Eds). IERS Conventions (2010). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010: 1
[25] Yoder C F, Williams J G, Parke M E. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1981, 86: 881
[26] Eubanks T M. Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics. Smith D E, Turcotte D L (eds.). Washington: American Geophysical Union, 1993: 1
[27] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77(3): 437
[28] Salstein D A, Rosen R D, Kann D M, et al. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74(1): 67
[29] Munk W H, Macdonald G J F, Anderson D L. American Journal of Physics, 1977, 45(3): 315
[30] Chen J L. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2005, 110(B8): 233
[31] Zhou Y H, Salstein D A, Chen J L. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111: 108
[32] 周永宏, 郑大伟. 测绘学报, 1999, 28(4): 313
[33] Zhou Y H, Zheng D W, Liao X H. Journal of Geodesy, 2001, 75(2): 164
[34] Morlet J. Issues in Acoustic Signal-Image Processing and Recognition. Berlin: Springer, 1983, 1: 233
[35] Bjerknes J. Monthly Weather Review, 1969, 97(3): 163
[36] Dickey J O, Marcus S L, Hide R, et al. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1994, 99(B12): 23921
[37] Niedzielski T. Advances in Geophysics, 2014, 55(6): 77
[38] Chao B F. Science, 1989, 243: 923

Correlation Analyses among ΔLOD, AAM and ENSO, and the 2020—2021 La Nina Event

KONG Zhao-yang[1,2], ZHOU Yong-hong[1,2,3], XU Xue-qing[1,3], AN Xian-ran[1,4]

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 4. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China)

Abstract: As the strongest climate variability at the interannual scale, the El Nino-Southern Oscillation (ENSO) has significant impacts on global weather and climate change. And it

is also closely related with the component of the interannual atmospheric angular momentum (AAM) and variation of length of day (ΔLOD). This paper calculates the excitation function of AAM, based on the dataset of National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research Reanalysis-1 (NCEP / NCAR R1) from January 1962 to January 2021, and compares the AAM with ΔLOD and the ENSO indices. The relations among the ENSO, AAM and ΔLOD are analyzed by statistical methods of cross-correlation and wavelet transform analyses. And the physical explanations of corresponding processes are discussed. The results show that the ΔLOD, AAM and ENSO are significantly related at the 99% level on the interannual time scale, and they have similar time-frequency wavelet spectra. The occurrences of ENSO events cause anomalies of atmospheric circulations, especially in the tropics and subtropics, which lead to variations in the AAM and LOD accordingly. Furthermore, the signal of a medium intensity La Nina event in 2020-2021 on the interannual component of ΔLOD is detected, and a change of about -0.18 ms occurs in ΔLOD series during this period.

Key words: length of day change; atmospheric angular momentum; ENSO; La Nina; wavelet analysis